

图像测量标定法及其应用

Application of the Method of Photogrammetric Orientated Determination

王建平¹, 王庆绥², 曹伟青¹

(1 北京百慕航材高科技股份有限公司, 北京 100095;

2 北京航空材料研究院, 北京 100095)

WANG Jian-ping¹, WANG Qing-sui², CAO Wei-qing¹

(1 BAIMTEC MATERIAL CO., LTD, Beijing 100095, China;

2 Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 论述了图像测量标定法, 并将其用于镍基单晶高温合金 DD3 的热机械疲劳断口结晶学小面取向的测定, 发现断口结晶学小面取向为 111 时, 材料具有较高的热机械疲劳寿命, 而结晶学小面取向为 001 时, 材料的热机械疲劳寿命较低。

关键词: 图像测量; 结晶学小面; 单晶高温合金; 热机械疲劳

中图分类号: TG146.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2002) 09-0044-03

Abstract: Method of photogrammetric orientated determination was presented, and applied to determine the crystallographic facet orientation on fracture of thermo-machanical fatigue of nickel base crystal superalloy DD3. The results show that the life of the alloy is high when the orientation of crystallographic facet is 111, the life is low when the orientation of the facet is 001.

Key words: photogrammetric technique; crystallographic facet; single crystal superalloy; thermo-mechanical fatigue

单晶高温合金断裂时, 其断裂机制因承载条件和取向的变化而有所不同, 因此所形成的断口结晶学小面也各不相同。人们通常借助对断口结晶学小面的分析来了解材料的断裂机制。所以断口结晶学小面的测量技术在材料的断裂机制研究中具有重要作用。目前对断口的观察及分析工作多局限于断口表面的形貌及其定性分析上, 而 A. Wart^[1] 和 G. Piazzesi^[2] 所提出的方法并未解决结晶学小面的取向问题。

作者认为, 在不损失原有形貌的条件下, 较为理想的工具是选用 X 射线衍射仪和扫描电子显微镜相互获得的结果, 借助图像测量标定法^[3], 便可准确地测定断口结晶学小面的取向。

本工作用此方法测定了不同取向的镍基单晶高温合金的热机械疲劳断口结晶学小面的取向, 对其断口形貌进行了观察, 对其断裂机制进行了探讨。

1 图像测量标定法^[3]

通过对扫描电子显微镜拍摄的两张有倾斜角度的照片上的同一点的两次平面坐标测量, 来求出该点在三维坐标系 (样品坐标系) 中的位置, 即

$$X = X_1 / M = X_2 / M$$

$$Y = (Y_1 + Y_2) / 2M \cos \Delta\tau$$

$$Z = (Y_1 - Y_2) / 2M \sin \Delta\tau$$

式中 M 是放大倍率, 最好取 100 左右, $\Delta\tau$ 是两次倾斜角之差的绝对值的一半, 即 $(\tau_1 - \tau_2) / 2$, (X_1, Y_1) 和 (X_2, Y_2) 是同一点在两次倾斜时的平面坐标位置。在断口照片中的同一结晶学小面上找出与该点不在同一条直线上的另两点。根据上式求出其空间坐标位置。这样, 这三点所在的平面的平面方程即可求出。

借助 X 射线衍射技术对断口所在的样品坐标系进行标定。通过旋转并与标准投影图相比较即可求得结晶学小面的真实取向。

2 试验条件

选用籽晶法制成的 DD3 镍基单晶高温合金, 其化学成分 (%) 为 9.5Cr, 5Co, 5.2W, 4.2Mo, 5.7Al, 0.005C, < 0.005B, 微量 Ti, 余 Ni, 制成热机械疲劳试样。

材料的热机械疲劳是指材料在受到温度循环影响时所产生的应力迭加周期机械应力而导致材料的

失效过程。此试验在红山 10t 电液伺服机上进行。为了更好地模拟叶片的实际工作状态，选用 100 ~ 980 温度循环下的热机械疲劳条件，其载荷范围 $\Delta\sigma/2 = \pm 539\text{MPa}$ ，频率 $f = 0.006\text{Hz}$ 。

3 结果与讨论

将生长方向分别接近 $[001]$ ， $[011]$ ， $[111]$ ， $[137]$ 取向的试样进行热机械疲劳试验。发现断口形貌受生长方向的影响非常显著，用图像测量标定法对断口上的结晶学小面的取向进行了测定。其寿命试验

结果、观察结果及测定结果列于表 1。
可见，断口表面具有结晶学小面，且断口具有韧性和脆性的混合型断口特征。材料断面法向与应力轴的夹角越大，说明裂纹扩展的途径比较长且比较复杂，因此材料的寿命较长。当材料产生严重的缩颈行为时，断面收缩使得局部应力集中，同时裂纹扩展途径缩短，故严重降低了材料寿命。在这种具有严重缩颈现象的断面上，很难观察到疲劳条带，同时其结晶学小面面积很小，这可能与材料过载产生的严重变形和疲劳寿命短有关。

表 1 断口的形貌特征、寿命及小面取向
Table 1 Morphology feature, life, and facet orientation of the fracture

样品号及取向	附图	主要形貌	疲劳条带	缩颈	寿命/cycle	小面取向
[001]	图 1a	表面较平滑，断面法向与应力轴夹角较小	可观察到疲劳条带	没缩颈	156	111
[111]	图 1b	断面呈尖锯齿状，高低不平，断面法线与应力轴夹角较大	可观察到疲劳条带	没缩颈	211	111
[011]	图 1c	扩展区呈准平面状，占断面 80% 以上，断面法线与应力轴夹角约 60°	没观察到疲劳条带	严重的各向异性缩颈	> 24	
[137]	图 1d	断面呈锯齿状，扩展区较大，表面凹凸不平	没观察到疲劳条带	严重的各向同性缩颈	71	001

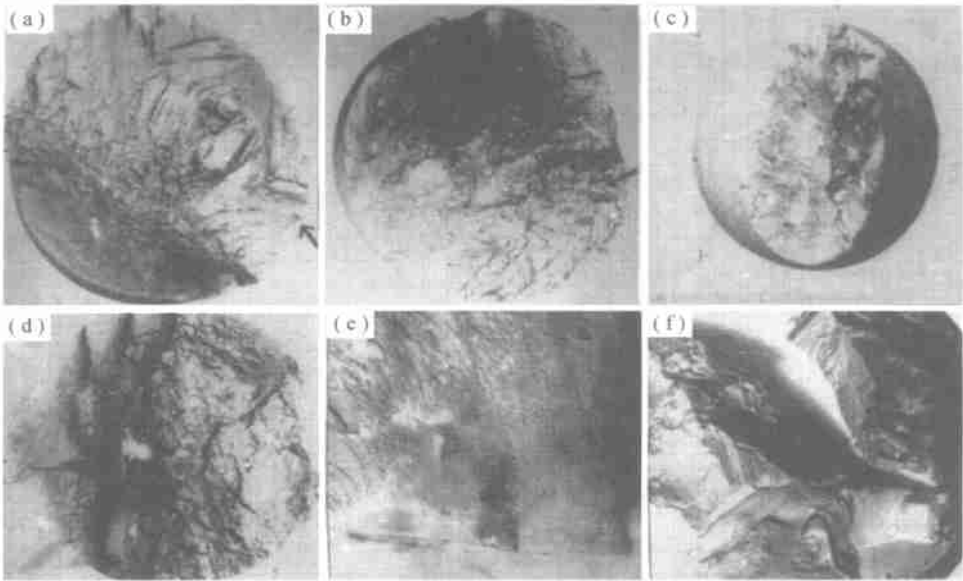


图 1 (a) $[001]$ 样品 5 \times ; (b) $[111]$ 样品 5 \times ; (c) $[011]$ 样品 5 \times ; (d) $[137]$ 样品 5 \times ;
(e) $[001]$ 样品的猫眼式表面疲劳源 50 \times ; (f) $[111]$ 样品内部枝晶间疲劳源 50 \times
Fig. 1 (a) sample of $[001]$ 5 \times ; (b) sample of $[111]$ 5 \times ; (c) sample of $[011]$ 5 \times ; (d) sample of $[137]$ 5 \times ;
(e) fatigue source of surface like cat eyes of $[001]$ 50 \times ; (f) fatigue source in inner interdendritic of $[111]$ 50 \times

对可以观察到疲劳条带的 $[001]$ ， $[111]$ 取向的断口进行的分析表明，裂纹源多发生在单晶内部枝晶间的组织疏松处，少量发生在外表面上。图 1e 为 $[001]$ 取向试样的断口疲劳源区。有多个表面裂纹源，

形状极像猫眼。这可能是铸造缺陷成源引起的疲劳断裂。图 1f 为 $[111]$ 取向试样的断口疲劳源区，有多个裂纹源。它们沿着枝晶主杆外围圆周的组织疏松处紧密地排列。这是由于在材料凝固时，枝晶臂间有一

定的间隙,故形成一些组织疏松,当材料在循环加载条件下,在孔洞处首先形成局部应力集中,在孔洞边缘处就有可能萌生出裂纹,后经扩展导致断裂。

表1的测量结果表明,当样品的断口表面的结晶学小面为111滑移面时,即材料的变形方式以八面体滑移为主时,单晶材料的寿命长。而当断口表面的结晶学小面为001滑移面时,即材料的变形方式以立方体滑移为主时,单晶材料的寿命短。这是由于在单晶高温合金的面心立方体中, γ/γ' 的位向关系匹配很好,八面体滑移系上位错运动所受阻力大的缘故。

4 结论

(1) 用图像测量标定法对DD3镍基单晶高温合金的热机械疲劳断口表面上的结晶学小面的取向进行了测定,证明此方法可行。

(2) 生长方向接近[001],及[111]试样的断口结晶学小面取向为111,生长方向接近[137]试样的断口结晶学小面取向为001。

(3) 结晶学小面取向为111时,材料变形方式为八面体滑移,此时材料具有较高的热机械疲劳寿命;而小面取向为001时,材料变形方式为立方体滑移,此时材料热机械疲劳寿命较低。

参考文献

- [1] Wart J A, Robetson. Metallograph, 1982, 15 (4): 367—381.
- [2] Piazzesi G P. J Phys (E), 1973, 6: 392—396.
- [3] 王建平. 材料工程, 1989, (4): 23.

收稿日期: 2001-08-28;

作者简介: 王建平(1963-),男,学士,高级工程师,联系地址: 北京市海淀区海淀西大街36号512室(100080)。

(上接第39页)

- [6] 曾光廷. 非金属夹杂物与钢的韧性研究[J]. 材料科学与工程, 2000, 18 (2): 87—90.
- [7] 肖纪美, 褚武扬. 环境断裂机理及控制措施[J]. 腐蚀与防护, 1999, 20 (1): 5—8.
- [8] 李鹤林. 天然气输送钢管研究与应用中的几个热点问题[J]. 中国机械工程, 2001, 12 (3): 349—352.

基金项目: 教育部重点实验室访问学者专项基金资助项目; 甘肃省自然科学基金资助项目(ZQ-95-019); 甘肃省兰州市甘肃工业大学科研基金资助项目

收稿日期: 2001-08-16

作者简介: 周琦(1963-),女,副教授,硕士。主要从事管线钢的氢致开裂及焊接韧性研究,联系地址: 甘肃工业大学材料学院(730050)。

欢迎订阅 2003 年度《无损检测》

《无损检测》系全国无损检测学会会刊及学会对外交流指定用刊。近年来被评为中国科协、国家机械行业以及上海市优秀科技期刊,在国内外颇具影响。

《无损检测》是一本集科学性、先进性、实用性于一体的应用技术期刊。本刊坚持普及与提高相结合,理论联系实际,面向生产、面向科研、面向行业的办刊宗旨,内容注重实用、有效,及时报道国内外无损检测行业的新成果、新技术、新工艺、新经验以及行业技术动态,内容包括超声、射线、电磁涡流、磁粉、渗透、声发射、红外、微波以及应力测定等。本刊主要栏目有科研成果及理论研究、综述、试验研究、实践经验、专题讲座、专题论坛、标准化、争鸣园地、教育培训资格认证、读者信箱、索引以及信息与动态等。本刊读者对象为工厂企业、大专院校及科研院所的无损检测工作者、工艺设计人员和技术管理人员。

《无损检测》国内外公开发刊,月刊(每月10日出版),大16开本,彩色胶印,2003年内心将从48页增至56页,订价仍为6.00元/册,全年72.00元,由全国各地邮政局(所)征订,邮发代号:4-237。欢迎广大读者到当地邮政局(所)订阅2003年《无损检测》。漏订者请与本刊编辑部联系,地址:上海市邯郸路99号,邮编:200437,电话:(021) 65556775-361,电子信箱:ndt@mat-test.com。

全国中文核心期刊

美国化学文摘(CA)收录核心期刊

中国科学引文数据库来源期刊

2003年《塑料工业》征订启事

《塑料工业》是国内外公开发行的中央级塑料专业技术刊物,1970年创刊,由中蓝晨光化工研究院、国学受力结构工程塑料工程技术研究中心、中国工程塑料工业协会树脂改性及合金专委会、全国合成树脂及塑料工业信息总站出版。本刊以技术性与信息性、合成工艺与加工应用相结合为其特色。主要栏目有:工业评述、合成工艺与工程、树脂改性及合金、成型加工与设备、材料性能与应用、物化分析与测试、塑料助剂与配混、新技术与产品开发,每期有国外塑料动态、国内塑料市场、中国塑料专利,每年有一篇国外塑料工业进展。《塑料工业》2003年为月刊,大16开,140页,每月20日出版,全年12期定价120元。邮发代号:62-71。联系电话:028-85570801,8555816,传真:028-85570801, www.plast-ind.com.cn, E-mail: office@plast-ind.com.cn。